

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1782

断层破碎带剪切作用下力链结构及演化 光弹试验研究

展亚太¹, 王金安^{1,2}, 李 飞¹, 杨 柳¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 断层破碎带颗粒介质体系中力链形成机制及其演化规律, 是研究含破碎带断层蠕滑、黏滑以及地震等地质灾害发生的重要基础。借助颗粒体双轴加载双向流动光弹试验装置, 对断层破碎带剪切作用下的宏观力学特性、破碎带中光弹力链网络结构及演化、力链空间分布及强度等特征进行研究。结果表明: (1) 断层破碎带中, 岩体颗粒之间通过力链传递力的相互作用; 破碎带与断层诱导裂隙带之间存在易滑段与不易滑段, 揭示了剪切作用下破碎带空间变形非均匀特征; 破碎带中岩体颗粒物质的重新排列, 引起易滑段与不易滑段的动态演化。(2) 破碎带中较大粒径角砾岩颗粒承载了断层上下盘之间的主要挤压及摩擦力, 起到了骨架支撑的作用; 随着剪力的增长, 强力链方向发生偏转, 向竖直方向靠拢。(3) 处于高应力状态的断层远离破碎带边缘位置岩体颗粒更容易发生破坏、碎裂、重新排列, 从而引起强力链空间方位的变化; 随着竖向荷载的增大, 强力链空间方位由明显各向非均匀性向各向均匀性转变。(4) 竖向荷载变化对断层破碎带中力链比例和颗粒接触力分布频率影响较小, 对力链空间分布及强度影响较大。

关 键 词: 断层破碎带; 剪切滑动; 光弹试验; 力链演化

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 08-2627-09

Photo-elastic experimental study on force chain structure and evolution of fault fracture zone under shear

ZHAN Ya-tai¹, WANG Jin-an^{1,2}, LI Fei¹, YANG Liu¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The formation mechanism and evolution of force chain in the granular media system of fault fracture zone are important foundations for studying the occurrence of geological disasters such as creep, stick-slip and earthquake. By photo-elastic test device of particles under biaxial loading and bilateral flowing conditions, the macro-mechanical characteristics, the network structure and evolution, the spatial distribution and strength of force chain in the fracture zone are studied under shear. The results show that in fault fracture zone, the interaction between particles of rock mass is transmitted through the force chain. There are easy sliding section and non-easy sliding section between the fracture zone and the fault-induced fracture zone, which reveals the non-uniform characteristics of spatial deformation of the fracture zone under shear. The rearrangement of rock particles in the fracture zone results in the dynamic evolution of easy sliding sections and non-easy sliding sections. The larger-sized breccia particles in the fracture zone carry the main compression and friction between the upper and lower plates of the fault, which plays the role of “skeleton support”. With the increase of shear force, the direction of the strong force chain is deflected in the vertical direction. Rock particles near the middle of the fracture zone are more likely to be destroyed, fractured and rearranged when the fault is in a high stress state, which results in the change of spatial orientation of strong force chain. With the increase of vertical load, the spatial orientation of strong force chain changes from obvious anisotropy to uniform isotropy. The change of vertical load has little effect on the force chain ratio and the distribution of particle contact force frequency in fault fracture zone, but has great influence on the spatial distribution and strength of the force chain.

Keywords: fault fracture zone; shear slip; photo-elastic experiment; force chain evolution

收稿日期: 2019-10-15

修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (十三五) 项目 (No. 2017YFC1503104)。

This work was supported by the National Key Research & Development Programs of China (2017YFC1503104).

第一作者简介: 展亚太, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程稳定性方面的研究工作。E-mail: zhanyatai@163.com

通讯作者: 王金安, 男, 1958 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: wja@ustb.edu.cn

1 引言

断层是在地壳构造变动过程中产生和发育起来的。断层（尤其是活断层）在全球和我国均有广泛的分布，活断层不但是新构造运动的主要表现形式之一，也是其他新构造运动，如断陷盆地、活动隆起等的边缘连接带和内部损伤带^[1-2]。断层通常具有由断层核和破碎带组成的复杂三维空间结构^[3-4]，裂缝发育的断层破碎带是断层的主体^[5]，其宽度由几厘米至数千米不等。许多矿产资源的形成、分布与富集以及强震或大震的发生往往同断层带的分布有关^[1]，且断层破碎带变形复杂、非均质强烈，绝大多数都深埋地下，给破碎带剪切滑动的直观研究带来很大的困难。因此，深入开展断层破碎带剪切作用下的光弹试验研究是必要的，弄清断层剪切滑动过程中宏观力学特性、破碎带中载荷传递路径及力链演化规律，揭示断层破碎带剪切滑动机制，对工程地质灾害的预测预警及防治具有一定的理论和实践价值。

针对断层破碎带颗粒介质体系的剪切滑动，国内外专家学者进行了许多相关的研究。数值研究方面，Morgan 等^[6-7]采用离散单元法建立二维断层剪切数值模型，研究了颗粒尺寸分布（PSD）和颗粒间摩擦力对断层力学行为及其剪切破碎带局部微力学性质的影响；任树林等^[8]采用二维颗粒流程序研究了断层破碎带颗粒形状对断层摩擦强度的影响，结果表明，异形颗粒间的咬合自锁作用大于圆形颗粒，致使异形颗粒充填的断层破碎带摩擦强度高于圆形颗粒填充的断层破碎带摩擦强度；Guo 等^[9]采用二维离散单元法对断层破碎带摩擦强度、力学行为和应力-应变演化状态及其对正应力及单轴抗压强度的依赖性进行了研究，发现模拟剪切区域经历了快速和慢速两个生长阶段并揭示了断层摩擦行为的时空复杂性；李鹏飞等^[10]采用 FLAC^{3D} 软件选取破碎带宽度、岩石内摩擦角、黏结系数等作为破碎带特征参数研究了破碎带对断层活化的影响。试验研究方面，何昌荣等^[11]利用天然断层泥和模拟断层泥进行了摩擦滑动剪切变形试验，研究了摩擦强度的温度与速度依赖性；Anthony 等^[12]利用室内双直剪试验研究了颗粒尺寸、形状、粗糙度以及接触面粗糙度等对断层摩擦强度及稳定性的影响，研究发现，颗粒棱角性和接触面粗糙度能够增加剪切破碎带的摩擦强度和应力分布；高青鹏等^[13]采用压剪试验研究了骨料粒径及节理倾角对岩体力学性质的影响；许江等^[14]利用煤岩剪切-渗流耦合试验装置对

不同充填度下含结构面砂岩的剪切-渗流耦合特性进行了研究；Clark 等^[15]利用二维滑块在光弹颗粒基质上沿平行于滑动方向施加不同频率的震动研究了其滑动行为，表明震动频率能够促进滑块的黏滑行为，同时观察到沿滑块底部出现水平链状力链。

基于对断层破碎带散体、非均匀物理学状态的基本判断，笔者通过断层破碎带剪切滑动的光弹试验，分析和阐述破碎带剪切作用下的宏观力学特性、破碎带中光弹力链网络结构及演化、力链空间分布及强度等特征，揭示其细观力学机制。

2 断层破碎带剪切光弹试验

2.1 试验装置

本试验采用颗粒体双轴加载双向流动光弹试验机^[16]，如图 1 所示，该试验机顶部和侧向分别有竖向加载电动机和水平加载电动机，电动机最大能够产生 5 kN 荷载，前进速度为 1~100 mm/min，最大进程为 200 mm，可通过位移控制或伺服控制来确定加载方式。光弹试验机使用方法详见文献^[17]。

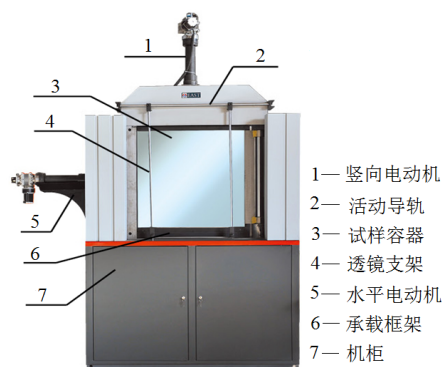


图 1 颗粒体双轴加载双向流动光弹试验机
Fig.1 Photo-elastic test machine of particles under biaxial loading and bilateral flowing conditions

2.2 试验材料

光弹材料是用美国产 Lexan×9030 TG Sheet 具有双折射效应的透明聚碳酸酯板切削加工而成，该材料具有良好的透光性和高抗冲击性，且易于加工和成型。试验采用 $\Phi 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、 $\Phi 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、 $\Phi 12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 三种尺寸的圆盘颗粒，以及 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的长方体颗粒。Lexan×9 030 透明聚碳酸酯板的性质见表 1。

2.3 模型及参数

根据相似理论^[18]和试验装置的尺寸，选择光弹试验模型的几何相似比为 62.5，压力相似比为 456。模型上部分别施加 50、100、150、200 N 竖向荷载，

表 1 Lexan×9 030 聚碳酸酯板参数
Table 1 Lexan×9 030 polycarbonate plate parameters

性质参数	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	泊松比 μ	抗拉屈服 强度 /MPa	抗拉破坏 强度 /MPa	弹性模量 E /MPa	抗弯屈服 强度 /MPa	挠曲模量 /MPa	维卡软化 温度 /℃	热变形 温度 /℃	静摩擦系数	动摩擦系数
数值	1.20	0.38	60	70	2300	90	2300	145	127	0.5	0.02
测定方法	ISO1183	ASTM-D638	ISO527	ISO527	ISO527	ISO178	ISO178	ISO306	ISO75	ASTM-D1894	ASTM-D1894

同时根据国内外地应力实测资料以及 Hoek 和 Brown 对现场地应力数据的回归分析^[9]，并结合本文研究中断层埋藏深度 408~1 631 m，选取岩体侧压力系数 λ 为 1.25。这里应当指出，侧压力系数取值仅影响剪力初始值，对下文试验中侧向剪切力-剪切位移曲线、力链结构及其演化规律没有影响。光弹试验分组见表 3。

表 2 光弹试验参数
Table 2 Parameters of photo-elastic test

模型 长度 /mm	实际 长度 /m	断层破碎带 宽度 /mm	断层破碎带 实际宽度 /m	几何 相似比	压力 相似比
760	47.5	80	5	62.5	456

表 3 光弹试验分组
Table 3 Photo-elastic test groups

组别	竖向荷载 /N	侧向剪力 /N	实际竖向地应 力/MPa	埋深 /m	实际断层带 宽度/m
1	50	62.5	10	408	5
2	100	125.0	20	815	5
3	150	187.5	30	1 223	5
4	200	250.0	40	1 631	5

光弹试验模型如图 2 所示，软材料①下端和②上端均位于断层破碎带宽度的中点位置，厚度与圆盘形颗粒厚度相同，宽度为 80 mm，同时由于该材料弹性模量较小，相比光弹颗粒更容易发生变形。因此，侧向水平加载时，泡沫软材料变形使得模型上半部分基本不动或者发生很小的位移，下半部分则随侧向加载板一起移动，从而实现断层在相对剪切力作用下产生摩擦滑动。

Φ 8 mm×3 mm、 Φ 10 mm×3 mm、 Φ 12 mm×3 mm 三种圆盘形颗粒按照 2:9:5 的比例混合充填至加载容器中（该比例可以使容器单位面积填充的颗粒数最多且排列最密实，此时平均颗粒密度为 0.752 cm⁻²）。充填高度为 80 mm 的圆形颗粒混合带代表断层破碎带，其中的光弹颗粒代表角砾岩、碎裂岩等岩体；破碎带上下与之直接接触的为微裂隙比较发育的诱导裂隙带，用 10 mm×10 mm×3 mm 的方形颗粒，每 3~5 块黏接拼对组成，上下两部分

充填高度均为 40 mm；由于方形颗粒材料数量有限，诱导裂隙带外侧岩体采用圆盘形颗粒填充，三种颗粒混合比例为 2:9:5，上盘部分填充高度为 350 mm，下盘部分为 330 mm。模型上部和侧面分别施加竖向与水平均布荷载模拟断层所受地应力与构造应力。

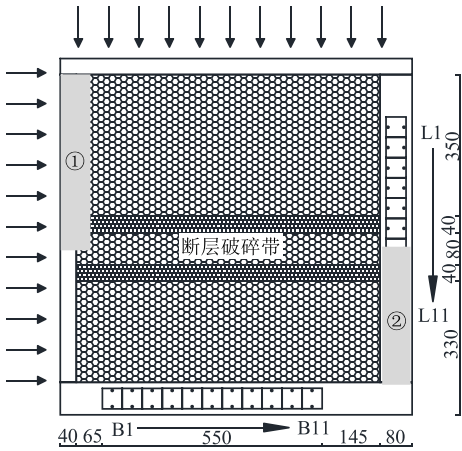


图 2 光弹试验模型（灰白色填充物①和②为泡沫软材料）
（单位：mm）

Fig.2 Photo-elastic test model (Gray-white fillers
① and ② are foam soft materials) (unit: mm)

2.4 试验过程

颗粒材料按照图 2 所示填充完毕后，分别施加竖向力与水平侧向力达到目标荷载后伺服，此时即为试验初始状态。光弹试验共分 4 组，根据压力相似比，可以计算断层附近的实际应力，从而得到断层破碎带的埋深，试验分组详见表 3。

试验过程中，竖向荷载保持恒定，水平方向采用位移控制，每次进刀 1 mm，用时 5 min。由于光弹试验装置中封装颗粒的容器材料为钢化玻璃，在较大荷载条件下容易发生破碎，为安全起见，设置侧向剪切力最大不超过 600 N。因此，当侧向剪力超过 600 N 时试验停止。

2.5 模型力链提取

进行光弹试验的目的是研究断层两盘发生剪切滑动时破碎带中光弹力链的结构形式及其演化特征，同时为了研究的直观性和 Matlab 软件计算的高效性，在进行光弹力链图像分析时，只对断层破碎带中的力链进行提取。

为量化处理光弹试验过程中拍摄的力链图像,需要对填充颗粒体进行光弹性标定,定量计算颗粒间平均接触力所使用的方法为彩色梯度均方值算法(G^2)^[20]。根据颗粒间接触力的大小将力链分为强力链,次强力链和弱力链,在对光弹图像进行处理时只提取强力链和次强力链。强力链、次强力链和弱力链的定义方法见文献[18]。

3 剪切作用下破碎带力链结构及演化

3.1 断层破碎带剪切滑动宏观力学特性

本文在竖向荷载为 50、100、150、200 N 条件下分别进行光弹试验。图 3 和图 4 分别给出了试验的侧向剪切力-剪切位移曲线和竖向位移-水平剪切位移曲线。由图 3 可看出,试验竖向荷载不同,破碎带剪切滑动所需的剪力不同,随着竖向荷载增大,侧向剪切力水平相应提高,同时剪力变化速率也相应增大。这是由于竖向荷载增大,破碎带中岩体颗粒挤压压实程度不断提高,角砾岩颗粒克服相邻颗粒之间的摩擦阻碍发生相对运动需要更大的剪切力。

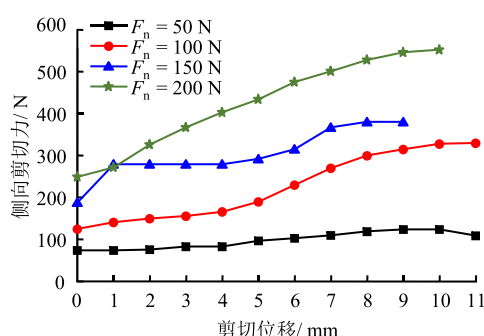


图 3 侧向剪切力-剪切位移曲线

Fig.3 Curves of horizontal shear force versus shear displacement

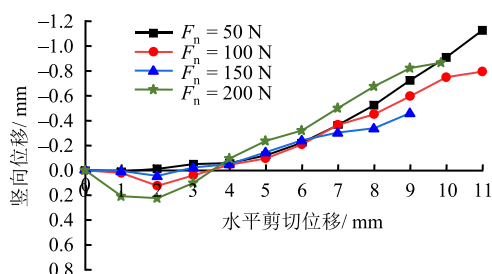


图 4 竖向位移随水平剪切位移变化曲线

Fig.4 Curves of vertical displacement versus horizontal shear displacement

由图 4 竖向位移随水平剪切位移变化曲线可知,剪切初始阶段,破碎带出现剪缩现象,这是由于小粒径岩体颗粒受剪进入破碎带孔隙及裂隙中,

同时部分裂隙发生闭合,导致体积减小,颗粒体系变密;随着剪位移增大,断层破碎带进一步受剪,角砾岩颗粒之间咬合稳定状态被破坏,产生相对移动,其运动必然要围绕相邻颗粒转动,造成体系膨胀,使得破碎带由剪缩转为剪胀;剪位移继续增大,颗粒体系剪胀速度放缓,一方面由于剪应力水平较高,导致岩体颗粒产生碎裂破坏,另一方面由于颗粒重定向排列。

3.2 断层破碎带剪切滑动细观力链演化

为了更清楚、更直观地对断层破碎带中的光弹力链在结构及演化方面进行系统研究与定量评价,选取竖向及侧向荷载较大的第 4 组试验。本组试验初始状态竖向均布荷载为 200 N,侧向均布荷载 250 N,试验分 10 步进行,共发生剪切位移 10 mm。选取试验过程中初始伺服、水平剪切位移发生 2、6、10 mm 几个状态进行细观力链演化的研究。

(1) 剪切作用下强力链向竖直方向偏转。由图 5 可知,力链呈根须状分布,初始状态整个断层破碎带中强力链主要沿 $70^\circ \sim 250^\circ$ 走向发展。随着剪位移增加,强力链明显增多且原生强力链走向发生偏转,向竖直方向靠拢,新生强力链演化行为与原生强力链基本一致(见图 5(a)~5(d)左图中红色双向箭头表示一条强力链偏转情况)。由于强力链出现时间不同,因此,原生强力链与新生强力链偏转程度不同,两者之间存在一定的夹角。模型中部力链较强,两侧力链较弱,这是由于软材料受力变形使得部分压力被释放。

(2) 破碎带边缘断续水平链状强力链的出现引起破碎带空间不均匀变形。剪位移 2 mm 时,破碎带上下边缘断续出现水平链状强力链(见图 5(b)中红色椭圆区域),反映了破碎带与断层两盘之间相互作用的强弱,即破碎带与两盘界面之间存在利于位移发生的易滑段和阻碍位移发生的不易滑段。易滑段为破碎带边缘次强力链、弱力链或无力链分布的区段,该区段破碎带与断层盘之间作用力较弱,引起的摩擦应力较小,在剪切力作用下容易发生相对滑移。不易滑段为破碎带边缘水平链状强力链出现的区段,该区段断层盘与破碎带作用力较强,从而引起较大的摩擦应力,摩擦自锁使得两者不易发生相对滑动。易滑段与不易滑段的出现揭示了剪切滑动过程中断层破碎带空间变形非均匀特征。

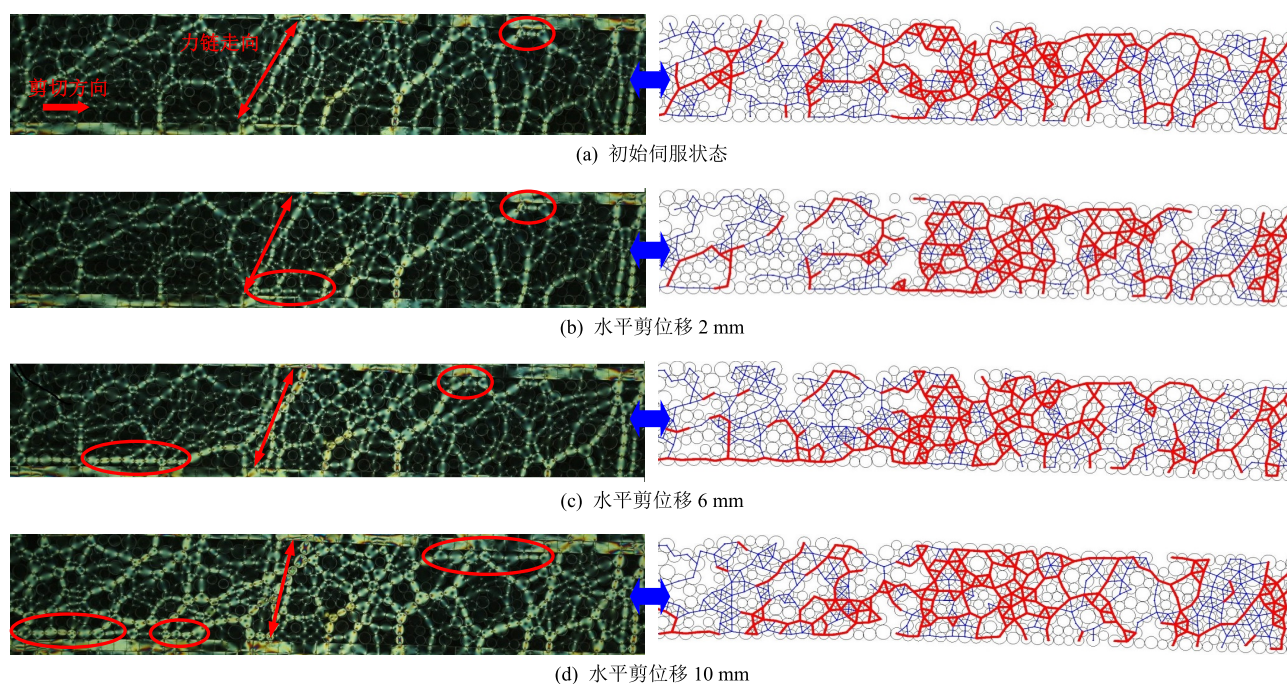
随着水平剪位移增大,边缘水平链状强力链增多且力链光带亮度明显提高(见图 5(c)),此阶段破碎带中岩体颗粒与诱导裂隙带复杂不规则界面之间接触更加充分,咬合作用增强;如图 5(d)所示,水

平剪位移进一步增大, 边缘部分断续链状强力链出现贯通, 且随剪力增长易滑段与不易滑段呈动态变化, 这是由于破碎带中岩体颗粒受摩擦挤压作用发生运动, 颗粒重新排列, 其咬合程度、接触形态及力学性质都将发生改变, 引起易滑段与不易滑段动态演化。

(3) 破碎带中力链呈各向异性分布且大粒径岩体颗粒成为主要承载体。断层破碎带中强力链提取如图5所示, 力链是经由各个光弹颗粒的中心相连组合而成, 并汇集成网络状。强力链多由贯穿直径较大颗粒的条纹连接而成, 说明断层破碎带中大直径砾岩颗粒起到了骨架支撑的作用, 承载了断层两盘之间的主要作用力。在破碎带及其上下边缘力链分布不均匀且不对称, 呈现出明显的各向异性, 此现象揭示了断层上下盘与破碎带之间不均匀接触特征, 同时破碎带中出现的应力集中现象也是不均

匀接触导致的。

(4) 破碎带剪切过程中强力链方位出现各向均匀性分布。强力链分布方位如图6所示, 初始伺服状态(见图6(a))强力链在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $110^{\circ} \sim 290^{\circ}$ 方向分布相对较多, 这是由于在地应力及构造应力共同作用下, 岩体颗粒所受剪切摩擦沿其合力方向。随着剪位移增大, 破碎带中小粒径碎裂岩受摩擦剪切进入邻近孔隙及裂隙中, 岩体颗粒的接触状态、咬合程度等随之改变, 强力链数量有所减少(对比图6(a)和(b)); 剪切位移继续增大, 颗粒体系中强力链数量明显增加, 同时在空间方位上强力链趋于各向均匀分布, 如图6(c)所示, 该现象与地震发生过程中的匀阻化条件^[21-22]具有相似性; 剪位移进一步增大, 岩体颗粒摩擦挤压程度加大, 强力链分布方位由各向均匀性向非均匀性转变, 力链方向发生偏转, 强力链向竖直方向靠拢, 如图6(d)所示。



注: 右图中红色网络代表强力链, 蓝色网络代表次强力链。

图5 断层破碎带剪切滑动力链演化及强力链提取结果

Fig.5 Force chain evolution and strong force chain extraction results of shear sliding in fault fracture zone

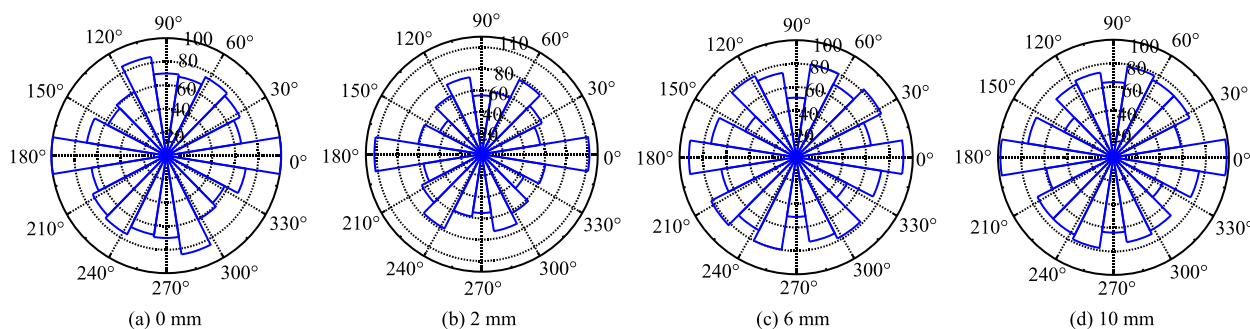


图6 断层破碎带强力链方位角变化(单位: 个)

Fig.6 Azimuth variations of strong force chain in fault fracture zone (unit: each)

3.3 荷载变化对破碎带中力链结构及演化影响

上述通过施加剪力研究了断层破碎带中强力链细观演化特征,在此基础上,通过改变模型竖向均布荷载,在剪切滑动相同位移(8 mm)条件下,研究竖向荷载变化对破碎带中力链结构及其演化的影响。

由图 7(a)可知,强力链主要分布在中部,呈渔网状,由于力链的不连续性,出现了如图虚线划分出的 3 部分,说明强力链网络连通性较差,揭示了破碎带中岩体颗粒级配较差以及各向异性分布特征。如图 7(b)~7(d)所示,随着竖向荷载增大,强力链分布范围扩大,由中部向两侧延伸,同时力链网络连通性更好,破碎带上下边缘断续、水平链状强、力链增多且出现贯通,出现了较多的拱形力链。说明由于竖向荷载的增大,断层两盘对破碎带的挤压作用增强,破碎带边缘易滑段减少而不易滑段增多,自锁效应明显增强,破碎带与两盘接触的附近区域更加稳定。因此在断层剪切滑动过程中,远离破碎带边缘位置的角砾岩颗粒受摩擦挤压作用更容

易发生破坏和碎裂,形成更小的岩粒和断层泥,从而可以解释处于高应力状态的断层其破碎带经常出现断层泥,而处于低应力条件没有或很少有断层泥出现的现象。

不同竖向荷载条件下断层破碎带中强力链方位角变化如图 8 所示,每个扇形小区域的长短代表该方向组成强力链的光弹颗粒数量。由图可知,竖向压力为 50 N 时,0°~180° 方向强力链颗粒数量为 133 个,竖向压力增大至 200 N,该方向强力链颗粒数量为 95 个;90°~270° 方向,竖向压力为 50 N 时强力链颗粒 73 个,100 N 时 76 个,增大至 150 N,强力链颗粒数量为 83 个。可以看出,随着竖向力的不断增大,0°~180° 走向强力链数量明显减少,90°~270° 走向强力链有所增加。因此,在相同剪位移条件下,高应力状态的断层其破碎带中岩体颗粒更易重排,从而引起强力链空间方位的变化,随着竖向荷载的增大,强力链空间方位由明显各向非均匀性向各向均匀性转变。

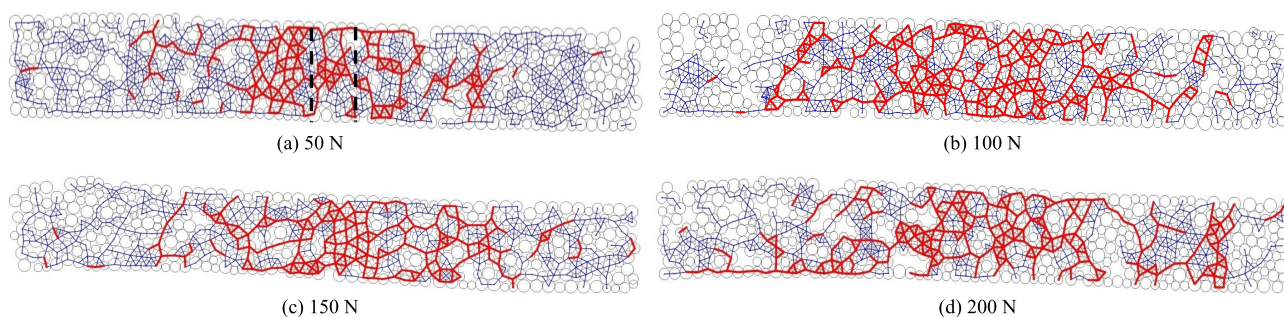


图 7 不同竖向荷载条件下断层破碎带中强力链分布

Fig.7 Distribution of strong force chain in fault fracture zone under different vertical loads

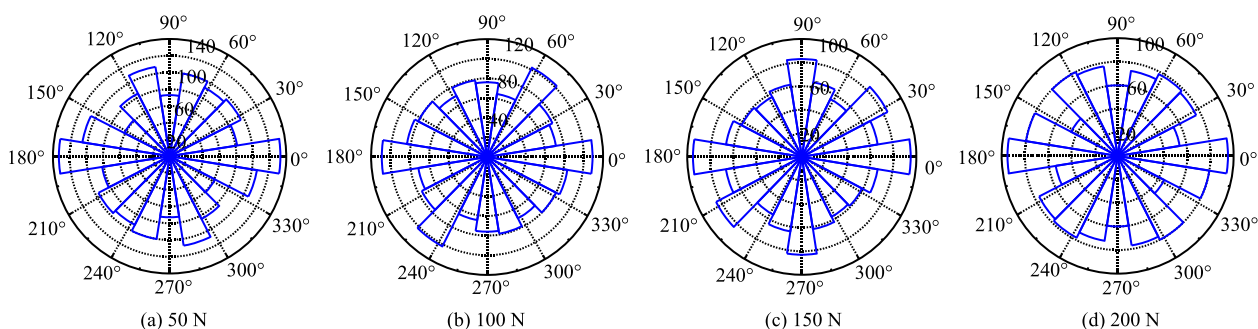


图 8 不同竖向荷载条件下断层破碎带中强力链方位角变化(单位:个)

Fig.8 Azimuth variations of strong force chain in fault fracture zone under different vertical loads (unit: each)

图 9 为不同竖向荷载条件下颗粒平均接触力曲线。由图可知,破碎带中岩体颗粒之间的平均接触力比颗粒体系所受外力低 1~2 个数量级且均随着剪切位移的增加呈波动式增长。竖向荷载为 100、150、200 N 对应平均接触力分别为 6.32、7.33、

8.41 N,可以看出,随着竖向均布荷载增大,颗粒平均接触力也相应增长。竖向力 50 N 对应的平均接触力为 2.72 N,与其他 3 组试验平均值差距较大,这是由于竖向压力较小导致破碎带中光弹力链亮度较低,提取的 G^2 值在计算平均力过程中出现较大误差。

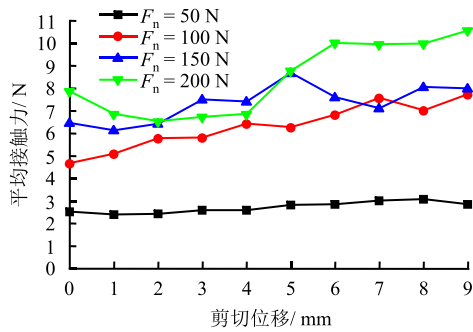


图 9 不同竖向荷载颗粒平均接触力

Fig.9 Average contact force of particles under different vertical loads

对比不同竖向荷载条件下断层破碎带中力链强度演变曲线 (见图 10), 可以看出 3 种力链比例分布基本一致: 弱力链占比最大, 强力链次之, 次强力链占比最小; 从曲线演变特征分析, 次强力链比例基本保持恒定, 随剪位移增大变化较小, 强力链与弱力链随剪位移增大呈相反的波动特征且弱力链分布在强力链周围, 对强力链起到辅助支撑的作用 (见图 5)。随着竖向荷载增大, 破碎带中岩体颗粒受摩擦剪切出现压密、位置调整及碎裂破坏等现象, 部分弱力链转化为强力链, 形成高强度的力链结构网络。

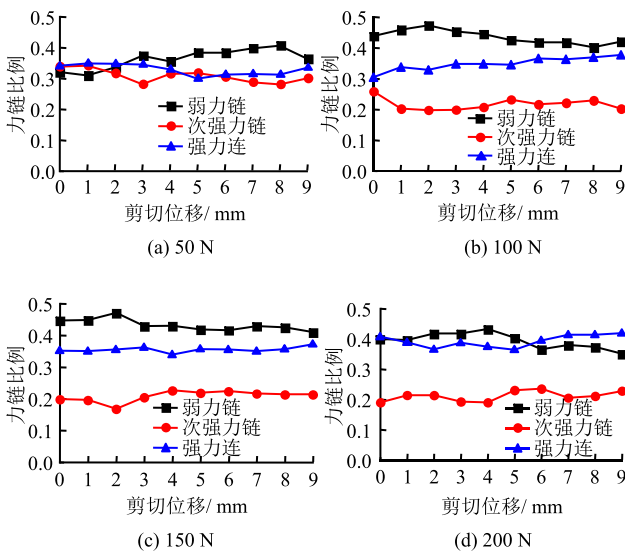
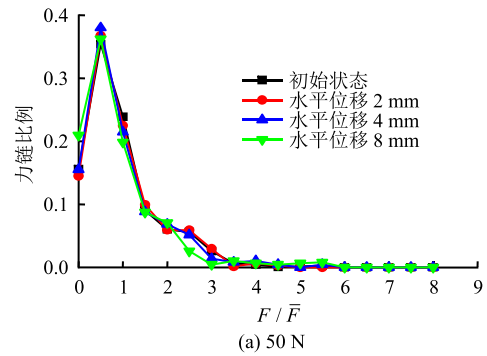


图 10 不同竖向荷载破碎带中力链强度占比变化曲线

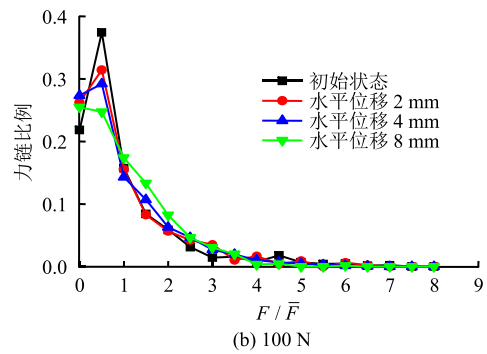
Fig.10 Curves of force chain strength percentage in fault fracture zone under different vertical pressures

颗粒接触力频率分布如图 11 所示, 不同竖向荷载条件下频率分布曲线走势基本一致, 接触力分布频率总体都在 0~1.5 倍平均接触力区间内, 几乎不存在大于 4 倍平均接触力的颗粒, 接触力频率分布峰值均在 0.5~1 倍平均接触力之间。由力链结构及演化对比分析初步可知, 竖向荷载变化对破碎带中

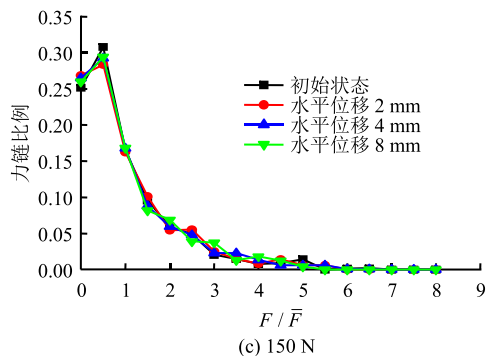
颗粒接触力分布频率影响较小, 对力链空间分布及强度比例影响较大。



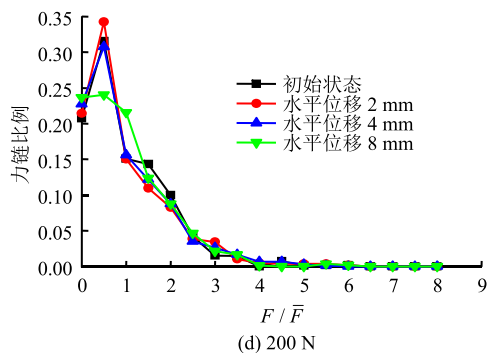
(a) 50 N



(b) 100 N



(c) 150 N



(d) 200 N

图 11 断层破碎带中颗粒接触力频率分布曲线

Fig.11 Distribution curves of contact force frequency in fault fracture zone

4 结 论

借助颗粒体双轴加载双向流动光弹试验方法, 通过对断层破碎带剪切过程中剪切力和剪切位移、力链分布及其强力链方位角变化、荷载变化等特征

的系统研究与定量评价,揭示出破碎带中光弹力链的结构形式及其演化规律,对研究断层活动规律有一定的启示。本文研究得出以下结论:

(1) 断层破碎带中,岩体颗粒之间通过力链传递力的相互作用;破碎带与两盘界面之间存在易滑段与不易滑段,揭示了剪切滑动过程中破碎带空间变形非均匀特征;破碎带中岩体颗粒物质的重新排列,引起易滑段与不易滑段的动态演化。

(2) 破碎带中较大粒径角砾岩颗粒承载了断层上下盘之间的主要挤压及摩擦力,起到了“骨架支撑”的作用;随加载剪力的增长,原生强力链方向发生偏转,向竖直方向靠拢,新生强力链与原生强力链演化规律基本一致;破碎带剪切过程中,强力链分布方位出现各向均匀性,与地震发生机制中的“匀阻化”条件具有相似性。

(3) 处于高应力状态的断层远离破碎带边缘位置岩体颗粒更容易出现破坏、碎裂、重新排列,从而引起强力链空间方位的变化;随着竖向荷载的增大,强力链空间方位由明显各向非均匀性向各向均匀性转变。

(4) 竖向荷载变化对断层破碎带中力链比例和颗粒接触力分布频率影响较小,对力链空间分布及强度影响较大。

参考文献

- [1] 黄福明. 断层力学概论[M]. 北京: 地震出版社, 2013.
HUANG Fu-ming. Introduction to fault mechanics[M]. Beijing: Seismological Press, 2013.
- [2] 邓龙胜, 范文, 彭建兵, 等. 走滑活断层对公路的致灾机理研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 35-41.
DENG Long-sheng, FAN Wen, PENG Jian-bing, et al. Research on failure mechanism of highway induced by strike-slip active fault[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2010, 23(3): 35-41.
- [3] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 570-578.
WU Zhi-ping, CHEN Wei, XUE Yan, et al. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2010, 84(4): 570-578.
- [4] KIM Y, PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Fault damage zones[J]. **Journal of Structural Geology**, 2004, 26(3): 503-517.
- [5] 张丽娟, 郭光辉, 何曙, 等. 碳酸盐岩断层破碎带构造成岩作用——以塔中 I 号断裂带为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 922-934.
ZHANG Li-juan, WU Guang-hui, HE Shu, et al. Structural diagenesis in carbonate fault damage zone: a case study of the No.1 fault zone in the Tarim basin[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2016, 32(3): 922-934.
- [6] MORGAN J K. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method: 2. effects of particle size distribution and interparticle friction on mechanical behavior[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1999, 104(B2): 2721-2732.
- [7] MORGAN J K, BOETTCHER M S. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method 1. shear zone kinematics and the micromechanics of localization[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1999, 104(B2): 2703-2719.
- [8] 任树林, 曾亚武, 赵凯. 颗粒形状对断层摩擦强度影响的数值试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 42-47.
REN Shu-lin, ZENG Ya-wu, ZHAO Kai. Numerical experiments on the effects of particle shape on frictional strength of faults[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2019, 17(3): 42-47.
- [9] GUO Y, MORGAN J K. Fault gouge evolution and its dependence on normal stress and rock strength-Results of discrete element simulations: Gouge zone micromechanics[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2008, 113(B08417): 1-19.
- [10] 李鹏飞, 刘启蒙, 陈秀艳. 影响断层活化的破碎带特征参数敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(5): 16-20.
LI Peng-fei, LIU Qi-meng, CHEN Xiu-yan. Sensitivity analysis on characteristic parameters of fracture zone with influence on fault activation[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2017, 13(5): 16-20.
- [11] 何昌荣, VERBERNE B A, SPIERS C J. 龙门山断裂带沉积岩和天然断层泥的摩擦滑动性质与启示[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 113-131.
HE Chang-rong, VERBERNE B A, SPIERS C J. Frictional properties of sedimentary rocks and natural fault gouge from longmenshan fault zone and their implications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 113-131.
- [12] ANTHONY J L, MARONE C. Influence of particle

- characteristics on granular friction[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2005, 110(B08409): 1-14
- [13] 高青鹏, 曹平, 王飞, 等. 压剪作用下多节理类岩试样力学性质及破坏判据[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1013-1022.
- GAO Qing-peng, CAO Ping, WANG Fei, et al. Mechanical properties and failure criteria of multi-joint rock-like specimens under compression-shear[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1013-1022.
- [14] 许江, 邬君宇, 刘义鑫, 等. 不同充填度下岩体剪切-渗流耦合试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3416-3424.
- XU Jiang, WU Jun-yu, LIU Yi-xin, et al. Experimental study of shear-seepage coupling properties of rock mass under different filling degrees[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3416-3424.
- [15] CLARK A H, BEHRINGER R P, KRIM J. Vibration can enhance stick-slip behavior for granular friction[J]. **Granular Matter**, 2019, 21(3): 1-7.
- [16] 王金安, 梁超, 庞伟东. 颗粒体双轴加载双向流动力链演化光弹试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3041-3047.
- WANG Jin-an, LIANG Chao, PANG Wei-dong. Photoelastic experiment on force chain evolution of particle aggregate under the conditions of biaxially loading and bilaterally flowing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3041-3047.
- [17] 王金安, 韩现刚, 庞伟东, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化光弹试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1): 13-22.
- WANG Jin-an, HAN Xian-gang, PANG Wei-dong, et al. Photoelastic experimental study on the force chain structure and evolution in top coal and overlying strata under fully mechanized top coal caving mining[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2017, 39(1): 13-22.
- [18] 陈再现, 陈苟桥, 吴斌, 等. 基于静力相似的缩尺拟动力试验方法数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊2): 307-311.
- CHEN Zai-xian, CHEN Shao-qiao, WU Bin, et al. The numerical simulation of pseudo-dynamic test method for scale model based on the static similar condition [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(Suppl.2): 307-311.
- [19] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- LI Si-guang. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1973.
- [20] 李飞, 杨柳, 王金安, 等. 混合颗粒体光弹力链定量提取方法[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3): 302-312.
- LI Fei, YANG Liu, WANG Jin-an, et al. A quantitative extraction method of force chains for composite particles in a photoelastic experiment[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2018, 40(3): 302-312.
- [21] 李建国, 王绳祖. 岩石错动面的非匀阻性与突发失稳[J]. 地震地质, 1992, 14(1): 79-88.
- LI Jian-guo, WANG Sheng-zu. Resistance nonuniformity and sudden instability of sliding zone in rocks[J]. **Seismology and Geology**, 1992, 14(1): 79-88.
- [22] 王绳祖, 施良骥. 岩石错动面的凹凸不平及两种突发失稳[J]. 地震地质, 1985, 7(3): 73-80.
- WANG Sheng-zu, SHI Liang-qi. Asperity of sliding zone and two different kinds of sudden instability in rocks[J]. **Seismology and Geology**, 1985, 7(3): 73-80.